تقویت خمشی و خمشی- برشی دال‌های مجوف بتن مسلح با استفاده از الیاف CFRP و GFRP و ورق‌های فولادی*

محمد مهدی صالحی یانه‌سری[۱]		علی مدانلو[۲]		مرتضی حسین‌علی بیگی[۳]		بهرام نوائی نیا[٤]

چکیده بسیاری از پل‌ها و ساختمان‌هایی که هم‌اکنون مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند از دال مجوف ساخته شده‌اند. استفاده از دال مجوف به‌منظور کاهش حجم بتن‌ریزی، هزینه و وزن سازه می‌باشد. برخی از این ساختمان‌ها و پل‌ها به‌خاطر حوادث طبیعی از قبیل زلزله ، باد و یا بر اثر خستگی مصالح و عوامل خورنده‌ی قلیایی و اسیدی آسیب‌های شدیدی دیده‌اند. ازاین‌رو، تعمیر و تقویت سازه‌های فوق امری حیاتی و مقرون به صرفه می‌باشد. در این تحقیق رفتار خمشی دال‌های بتن‌آرمه مجوف تقویت‌شده با استفاده از سیستم‌های مختلف FRP و ورق‌های فولادی به‌کمک مدل‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تعداد ۸ نمونه دال‌های بتن‌آرمه مجوف به ابعاد ۲۰cm×۴۵×۱۵۰ طبق آیین‌نامه‌ی آبا ساخته شده است. در این دال‌ها مقدار آرماتور کششی معادل ρ_b ۰/۲۵ می‌باشد و در همه‌ی آن‌ها دو سوراخ سراسری به قطر ۱۰ cm ایجاد شده است. یک دال به‌عنوان مرجع (تقویت‌نشده) و هفت دال دیگر توسط ورق و لامینیت CFRP، ورق GFRP و ورق فولادی تقویت و تست شده‌اند. در حین آزمایش نیروها، کرنش‌ها و تغییر مکان‌ها ثبت شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش مقاومت خمشی ایجاد شده در دال‌های تقویت شده با لامینیت FRP حدود ۴۳٪، ورق CFRP حدود ۵۷٪، ورق GFRP ۴۵٪ و ورق فولادی ۱۵٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی دال مجوف، تقویت خمشی و خمشی- برشی، الیاف CFRP و GFRP، ورق‌های فولادی.

The Flexural Strength and Flexural - Shear void Concrete Slabs with CFRP and GFRP and Steel Sheets

M.M.Salehi Yanehsari		A.Modanloo		M.Beygi		B.Navayi Neya

Abstract *A large number of bridges and buildings that are currently used, are made of slabs with opening. Some of these buildings and bridges have been severely damaged because of natural disasters such as earthquake, storm and other effects such as materials fatigue and alkaline and corrosive agents. Therefore, retrofitting and strengthening of these structures is essential and affordable. In this research, by applying experimental models, the flexural behavior of reinforced concrete slabs with opening strengthened with different FRP systems and steel sheets have been studied. Eight specimens of reinforced concrete slabs designed according to the Iranian code ABA with the dimensions of 150×45×20 cm were manufactured. In these slabs, the amount of tensile reinforcement was equal to* $0.25\rho_b$. *Two openings across the length of each slab with 10 cm diameter were created. One slab was considered as reference (not strengthened) and seven other slabs were strengthened with CFRP laminates, GFRP sheets and steel sheets, and tested. Forces, strains and deflections were recorded during the tests. The results of this research show that the flexural strength increases about 43% in the strengthened slabs with FRP laminates, about 57% with CFRP sheets, 45% with GFRP sheets and 15% with steel sheets.*

Key Words Void slab, CFRP-GFRP Laminate, steel sheet

---

*تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۱۱/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۱۱/۱ می‌باشد..

(۱) نویسنده مسؤول، دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

(۲) کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

(۳) استادیار، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

(٤) استادیار، دانشگاه صنعتی (نوشیروانی) بابل.

مقدمه

به دلایل مختلفی چون خرابی های ناشی از عوامل محیطی نظیر خوردگی و یا وزش بادهای شدید و خطاهای محاسباتی و تضعیف اعضا در اثر اهمال در نگهداری صحیح، خسارات وارده به ساختمان ناشی از جنگ و زلزله و ...، تغییر کاربری و بارهای بهره برداری وارد به سازه، ضعف آئین نامه قدیمی و .... ممکن است سازه های ساخته شده فاقد مقاومت و شکل پذیری لازم در مقابل بارهای اعمالی تشخیص داده شوند. از این رو تقویت و نوسازی مجدد سازه های مورد بحث، در دستور کار قرار خواهد گرفت. به‌طور کلی تقویت سازه‌ها در اغلب این موارد بسیار اقتصادی‌تر از ساخت مجدد سازه می‌باشد. به‌همین منظور محققان زیادی مسأله‌ی تقویت را مورد توجه قرار داده‌اند. تقویت سازه، بیش‌تر به‌دنبال افزایش مقاومت و بهبود شکل‌پذیری و رفتار اعضای موجود می‌باشد. نیاز به تقویت خمشی دال‌های بتنی با توجه به کاربرد فراوان آن، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. لذا تقویت خمشی دال‌های بتن‌آرمه به روش‌های مختلف هم‌چون تقویت با ورقه‌های فولادی، الیاف پلیمری مسلح و یا تقویت با آرماتورهای خارجی نیز توجه محققان بسیاری را خصوصاً در دهه‌ی گذشته به خود جلب کرده است. این تقویت‌ها می‌توانند منجر به افزایش ظرفیت خمشی و یا برشی سازه و یا هر دوی آن‌ها باشد. دال‌ها در ساختمان‌ها و عرشه‌ی پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [1].

به‌علت عبور لوله‌ها و تأسیسات مکانیکی، بازشدگی در این دال‌ها ایجاد می‌شود. وجود این بازشوها ظرفیت برشی را کاهش می‌دهد.

در یک دهه‌ی اخیر، مطالعات زیادی در زمینه‌ی مقاوم‌سازی و تقویت اعضای بتن مسلح مانند تیرها، ستون‌ها در برش، خمش و حتی پیچش با استفاده از الیاف پلیمری مسلح به‌صورت پوشش بیرونی انجام گرفته است [3-1]. با وجود تحقیقات گسترده در زمینه‌ی تیرها و ستون‌های بتن مسلح، در مورد دال‌های بتنی به ویژه دال‌های مجوف فعالیت‌های تحقیقاتی کمی انجام شده است. رفتار خمشی دال‌های یک طرفه‌ی تقویت‌شده با نوارهای الیاف کربن تحت بارگذاری نقطه‌ای توسط واسکیوس و کبهری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نوارهای الیاف کربن به‌صورت پوشش بیرونی، ظرفیت باربری دال‌های تقویت‌شده را افزایش می‌دهد. علاوه‌براین، در دال‌های تقویت‌شده نسبت به دال تقویت نشده، ترک‌های ایجادشده کوچک‌تر و به‌طور یکنواخت‌تری توزیع گردیده‌اند [4]. موسالام نیز تحقیقاتی را بر رفتار خمشی دال‌های دوطرفه‌ی بدون بازشوی تقویت شده با الیاف پلیمری مسلح تحت بارگذاری یکنواخت انجام داده است. این مطالعه نشان می‌دهد که سیستم‌های الیاف پلیمری مسلح در افزایش ظرفیت باربری دال‌های دوطرفه مناسب می‌باشند [5]. در دانشگاه فنی و مهندسی نوشیروانی، آقای بحرینی در مورد تقویت دال با استفاده از نوارهای الیاف شیشه آزمایش‌هایی انجام داد. در این تحقیق برای ارزیابی تقویت خمشی دال‌های بتنی یک طرفه‌ی تقویت شده با ورقه‌های نوارهای الیاف شیشه با استفاده از رزین اپوکسی، ۱۵ نمونه دال بتنی به‌طول 100 سانتی‌متر و به عرض50 سانتی‌متر ساخته شد و این ۱۵ نمونه در ۵ گروه سه‌گانه شناخته شدند. تفاوت بین این گروه‌ها، مقدار آرماتور کششی استفاده شده، در نظر گرفته شد. آن‌چه که از آزمایش‌ها مشاهده شد این بود که با افزایش سطح مقطع ورقه‌های الیاف شیشه، مقاومت نهایی دال افزایش و شکل پذیری آن کاهش می‌یابد. در اثر تقویت، ترک‌های خمشی محدود شده و در هنگام شکست نهایی ترک‌ها خمشی–برشی رشد بیش‌تری پیدا کرده و در حالی که عرض ورقه‌ها برابر عرض دال باشد اولین ترک‌خوردگی در بار بیش‌تر به‌وجود آمده است. تغییرشکل و شکل‌پذیری دال‌های تقویت‌شده‌ی خمشی از دال‌های تقویت‌نشده کم‌تر است [٦]. در سال ٢٠٠٤ آقایان ژانگ و راهوان، رفتار سه دال بتن‌آرمه‌ی یک‌طرفه را به ابعاد ۲۵× ۱۰۰× ۳۳۰

سانتی‌متر که با استفاده از شبکه‌ی میلـه‌گردهـای الیـاف کربن تقویت شده‌اند مورد بررسی قرار دادنـد. در ایـن آزمایش شکل ترک خوردن، تغییر مکان‌ها، کرنش‌هـا و مد شکست دال‌ها اندازه‌گیری شد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشـان داد کـه دال‌هـای تقویت‌شده با الیاف پلیمری مسلح تغییر مکان کـم‌تـری نسبت به دال تقویت‌نشده دارند. با استفاده از تقویت با شبکه‌ی میلگردهـای الیـاف کـربن ضـخامت دال‌هـا را می‌توان کم‌تر کرد. شکست تمام دال‌های تقویت‌شده از نوع برشی بوده است و هـم‌چنـین مقاومـت و سـختی دال‌های تقویت‌شده افزایش می‌یابد [7].

در سـال ۲۰۰۶ در دانشـگاه تکنولـوژی دانمـارک، آقایـان روسینسـکی و اولافسـون در مـورد تقویـت دال‌های دو طرفه‌ی دارای بازشو تحقیقاتی انجام دادند. آنها یازده دال به ابعاد ۲/۶×۲/۶ متر و با ضـخامت ۱۰ سانتی‌متر ساختند که یک دال بدون بازشـو و ۵ دال بـا سوراخ ۰/۸۵×۰/۸۵ (گروه S) و تعداد ۵ دال دیگـر بـا سوراخ m ۲/۱×۲/۱ (گـروه L) سـاخته شـد و همـه‌ی آن‌ها دارای آرماتور یکسان بودند.

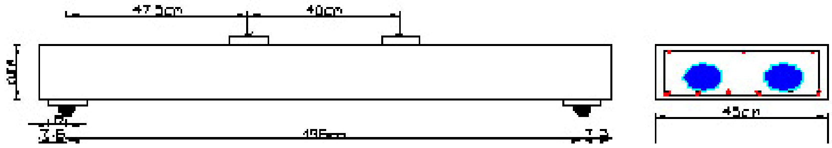
در این آزمایش، یک دال در هر دو گروه از دال‌هـا را به‌عنوان شاهد و بدون تقویت، یک دال را با اسـتفاده از میلگرد و با زاویه‌ی ۴۵ درجه، یک دال با اسـتفاده از ورق الیاف کربن با زاویه‌ی ۹۰ درجه و یک دال را هـم با ورق الیاف کربن با زاویـه‌ی ۹۰ درجـه و ۴۵ درجـه به‌صورت توأماً در اطراف سوراخ تقویت کردند. نتـایج حاصل از این آزمایش نشان داد که افزایش مقاومت در دال‌هـای تقویـت‌شـده ۱۲۵٪-۲۴ دال‌هـای شـاهد و ۱۱۰٪-۲۲ دال بدون بازشو بـوده اسـت. بـا اسـتفاده از تقویت با ورق الیاف کربن می‌توان ترس وجود سوراخ در دال‌ها را از بین برد و یک سـازه‌ی مقـاوم در برابـر بارهای زیاد به‌وجـود آورد و دال بـا بـازشـو مقاومـت سازه‌ای خیلی بیش‌تری نسبت به دال بدون بـاز شـو از خود نشان می‌دهد [8].

مشخصات دال‌ها

در این پژوهش، ۸ دال مجوف به طول ۱۵۰ سـانتی‌متـر، عرض ۴۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲۰ سانتی‌متر با نسـبت آرماتور کششی معادل $\rho_b = 0.25\rho_{\max}$ ساخته شدند. از پنج میلگرد آجدار نمره ۱۲ به عنوان آرماتور کششـی و سه میلگرد ۸ به‌عنـوان میلگـرد فشـاری اسـتفاده شـده است.

آرماتورهای برشی به قطر ٦ میلـی‌متـر در فواصـل مرکـز بـه مرکـز ۱۰ سـانتی‌متـر در (۱/۵) کنـاری و۲۰ سـانتی‌متـر در (۳/۵) میـانی از یکـدیگر قـرار دارنـد. هم‌چنین از میلگردهای نمره ٦ در فواصل مرکز به مرکز ۱۵ سانتی‌متر به‌عنـوان میلگردهـای حرارتـی در بـالا و پایین دال در جهت عمود بر میلگردهای اصلی اسـتفاده شده است.

دو بازشدگی به قطر ۱۰ سانتی‌متـر در تمـام طـول دال ایجـاد شـده اسـت. مشخصـات و نحـوه‌ی آرماتورگـذاری دال هـا در شـکل (۱) نشـان داده شـده است.



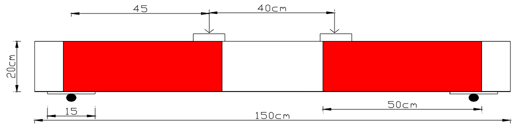
شکل ۱ مشخصات دال‌ها

نحوه‌ی تقویت دال‌ها

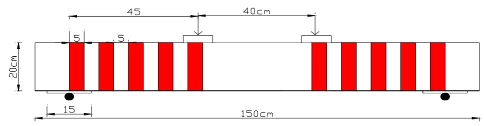
دال‌ها از جهت نوع الیاف FRP و ورق فولادی تقویتی به چهارگروه *L*، *G*، *C*، *S* نام‌گذاری شده‌اند. یک دال هم به عنوان دال مرجع (تقویت‌نشده) می‌باشد که به اسم REF نام‌گذاری شده است. گروه L شامل دو دال به نام‌های L-1 و L-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی دو ورق لامینیت به شکل نواری به ابعاد ۵ × ۱۵۰سانتی‌متر تقویت شده‌اند.

دال L-2 علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است. برای این کار از پنج ورق به ابعاد ۵×۲۰ سانتی‌متر از نقطه‌ی اعمال بار تا تکیه‌گاه با فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر از هم استفاده شده است. گروه *G* شامل دو دال به نام‌های G-1 و G-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی الیاف شیشه (GFRP) به ابعاد ۴۰× ۱۵۰سانتی‌متر تقویت شده‌اند. دال *G-2* علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است. برای این کار از ورقی به ابعاد ۴۵×۲۰ سانتی‌متر از نقطه‌ی اعمال بار تا تکیه‌گاه استفاده شده است.

گروه *C* شامل دو دال به اسم‌های C-1 و C-2 می‌باشد که هر دو دال به‌وسیله‌ی دو لایه الیاف کربن (CFRP) به شکل نواری به ابعاد۱۰× ۱۵۰سانتی‌متر تقویت شده‌اند. دال *C-2* علاوه بر تقویت خمشی تقویت برشی نیز شده است، شکل و مقدار تقویت برشی شبیه دال G-2 بوده است و گروه *S* نیز شامل یک دال به اسم *S* می‌باشد که به‌وسیله‌ی دو ورق فولادی به ابعاد ۱۰×۱۵۰سانتی‌متر تقویت شده‌اند. در هر گروه یک دال به‌عنوان نمونه‌ی مرجع و سه دال دیگر با ورق‌های CFRP، GFRP و لامینیت های CFRP در دهانه‌ی برشی دال‌ها (فاصله‌ی بین محل اعمال بار و عکس‌العمل تکیه‌گاهی) تقویت شدند. دال‌های L-1 و L-2 با لامینیت‌های CFRP در فواصل مرکز به مرکز ۱۰ سانتی‌متر، دال‌های C-1 و C-2 با ورق‌های CFRP و دال‌های G-1 و G-2 با ورق‌های GFRP تقویت شدند. نحوه‌ی تقویت دال‌ها در شکل (۳ و ۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نحوه‌ی تقویت برشی نمونه‌های C-2 و G-2



شکل ۳ نحوه‌ی تقویت برشی نمونه‌ی L-2

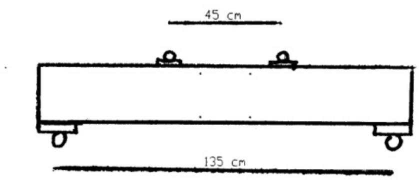
در این پژوهش از بتن معمولی استفاده شده است که مقاومت فشاری (استوانه ای) ۲۸ روزه‌ی بتن در حدود 30MPa حاصل گردیده است.

لامینیت‌های CFRP به عرض 50 میلی‌متر پس از آماده‌سازی سطح به جان دال‌ها در منطقه‌ی دهانه‌ی برشی متصل گردید. خواص لامینیت‌ها و ورق‌های CFRP، ورق‌های GFRP طبق گزارش کارخانه‌ی سازنده، در جدول (۱) و مشخصات ورق‌های فولادی در جدول (۲) آورده شده است.

روش کلی آزمایش

پس از تقویت دال‌ها و عمل‌آوری رزین، به‌منظور مشخص نمودن محل دقیق ترک‌ها، سطح تیرها به‌وسیله‌ی رنگ سفید شده است. هم‌چنین در ارتفاع دال در وسط دهانه دکمه‌هایی مطابق شکل (٤) برای اندازه‌گیری کرنش‌ها و تغییرمکان‌سنج نصب شده است. در این آزمایش‌ها، تیرها در مراحل مختلف بارگذاری شدند. بار افزایش داده شد و هر نقطه از دال که ترک برداشت، بلافاصله ادامه‌ی بارگذاری متوقف شد و کلیه‌ی تغییرات ثبت و مسیر ترک‌ها بر سطوح دال کاملاً مشخص شد و مقادیر بار ترک بر روی دال

یادداشت گردید تـا مکـانیزم مسـیر و شـکل تـرک‌هـا به‌منظور ارزیابی‌های بعـدی کـاملاً در دسـترس باشـد. هم‌چنین در هر گام بارگذاری بـه‌وسـیله کـرنش‌سـنج، تغییرات کرنش در ارتفاع تیر نیز ثبت شد و در نهایـت بارگذاری تا مرحله‌ی گسیختگی دال ادامـه یافـت و بـا ثبت حالت گسیختگی و تهیه تصـاویر از ایـن حالـت، آزمایش به پایان رسید.



شکل ٤ موقعیت دکمه‌ها در ارتفاع دال‌ها

نتایج آزمایشگاهی

نمودارهای بار-تغییر مکان نمونه‌ها. بـرای بررسـی سختی و تغییر مکان دال‌هـا، منحنـی بـار-تغییـر مکـان آن‌ها مورد بررسی قـرار گرفتـه اسـت شـکل (٦ و ٥). ملاحظه می‌شود که سـختی دال‌هـای تقویـت شـده بـا الیاف کربن نسبت به نمونه‌ی مرجع افزایش یافته است در حالی که سختی دال‌های تقویت‌شده با الیاف شیشـه نسبت به نمونه‌ی مرجع کاهش یافتـه اسـت. شکسـت تمام دال‌ها ترد است که نشان دهنـده‌ی جـاری نشـدن میلگردهای خمشی و الیاف FRP می‌باشـد. در هـر دو سـری نیـز بـیش‌تـرین سـختی مربـوط بـه دال‌هـای تقویت‌شده با لامینیت‌های CFRP است.

نمودارهای بار-کرنش کششی دال‌ها (نمونه‌ها)

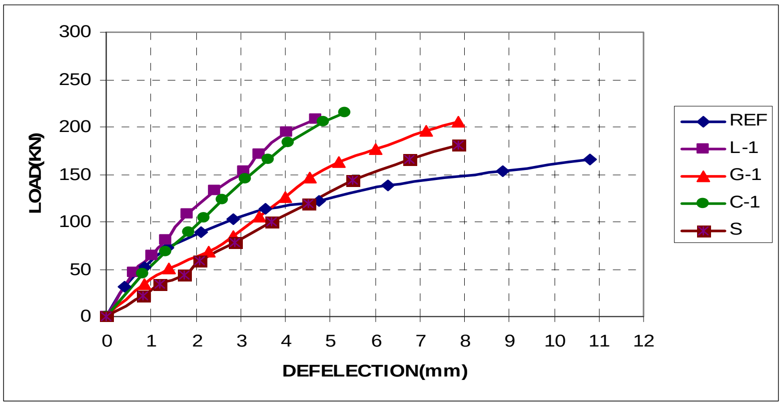
با مشاهده‌ی شکل (٧) مربوط بـه نمـودار بـار کـرنش کششی دال‌های REF، L-1، G-1، C-1 و S به این نتیجه می‌رسیم که شکل‌پذیری دال REF بیش‌تـر از دال‌هـای تقویت‌شده می‌باشد. می‌توان گفت بـا تقویـت خمشـی یک دال بتن‌آرمه‌ی یک طرفه، شکل‌پذیری آن کاهش و سختی آن افزایش می‌یابد. از طرفی با مشاهده‌ی شـکل (٨) مربوط به نمودار بار کرنش کششی دال‌هـایREF ، L-2، G-2، C-2 به این نتیجه می‌رسیم که شکل‌پـذیری دال REF بیش‌تر از دال‌هـای تقویـت شـده مـی‌باشـد. مـی‌تـوان گفـت بـا تقویـت خمشـی-برشـی یـک دال بتن‌آرمه‌ی یک طرفه، شکل‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

جدول ١ خواص الیاف مورد استفاده

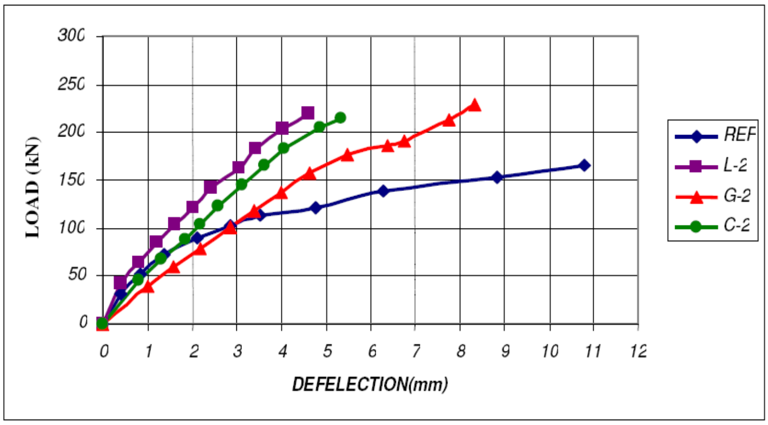
کرنش نهایی (٪)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت نهایی (MPa)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	مصالح تقویتی
١/٨	١٦٥	٣٠٠٠	٥٠	١/٢	CFRP Laminate
١/٦	٢٤٠	٤٠٠٠	–	٠/١٧٦	CFRP Sheet
٢/٢	٧٧	١٧٠٠	–	٠/٣	GFRP Sheet

جدول ٢ مشخصات ورق فولادی

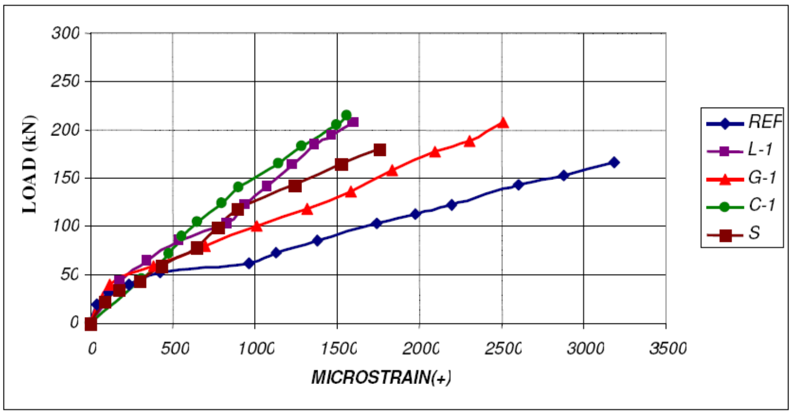
جرم واحد حجم kg/cm^3	وزن واحد حجم kg/cm^3	تنش در جاری شدن kg/cm^2	تنش حد تسلیم kg/cm^2	عرض (mm)	ضخامت (mm)	مدول الاستیسیته kg/cm^2
٧٩٥	٧٨٥٠	٢٤٠٠	٣٧٠٠	١٠٠	٤	٢٠٦٠٠٠٠



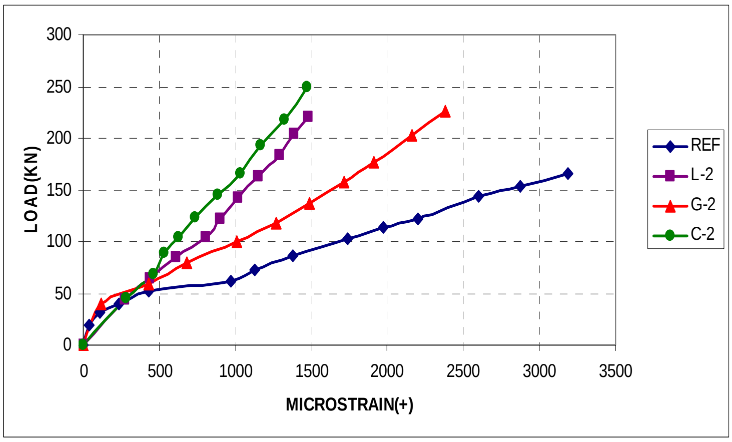
شکل ٥ منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال‌های REF، L-1، G-1، C-1 و S .



شکل ٦ منحنی بار- تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال‌های REF، L-2، G-2، C-2



شکل ٧ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌های REF، L-1، G-1، C-1 و S



شکل ۸ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌های REF، L-2، G-2، C-2

مقایسه‌ی دال REF با دال‌های L-1، G-1، C-1 و S

با مشاهده‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌ها اولین ترک خمشی ایجادشده در دال REF در بار KN ۳۱ بوده است در حالی که اولین ترک خمشی ایجادشده در دال‌های L-1، G-1، C-1 و S به‌ترتیب برابر kN ۴۳، ۵۰KN، kN ۴۵ و kN ۴۵ بوده است. اولین ترک این دال‌ها در باری تقریباً ۱/۳۹، ۱/۶۱، ۱/۴۵، ۱/۴۵ برابر دال مرجع به‌وجود آمده است.

شکست دال REF در بار kN ۱۶۶ اتفاق افتاد که این شکست از نوع خمشی بوده و با جاری شدن میلگردهای کششی همزمان بوده‌است، در حالی که شکست دال‌های L-1، G-1، C-1 و S به‌ترتیب ۲۱۰ -kN، ۲۱۵ kN، kN ۲۳۵ و kN ۱۹۰ بوده و شکست آن از نوع برشی بوده است. در تحلیل شکست‌های برشی ایجاد شده می‌توان گفت که علی‌رغم مبانی درست طراحی دال، رفتار این دال‌ها با ابعاد انتخابی مانند یک تیر یک‌طرفه عمل کرده و به دلیل نداشتن میلگرد برشی کافی و عدم تأمین نیاز برشی، شکست برشی حادث شده است. این در حالی است که رفتار دال و مبانی طراحی آن بر مبنای حالت خمش انجام می‌گیرد و بحث تأمین مقاومت برشی گفته‌شده در اولویت‌های طراحی نیست. در هر حال، دال‌های مورد آزمایش بسان یک تیر یک‌طرفه عمل می‌کنند و به دلایل ذکرشده شکست برشی صورت گرفته‌است و این دال‌ها نتوانسته‌اند تمامی ظرفیت خمشی خود را نشان دهند.

همان‌طور که مشاهده شده افزایش مقاومت ایجادشده در دال تقویت‌شده با لامینیت حدود ۲۷ ٪، تقویت‌شده با شیشه ۳۰٪ تقویت شده با کربن ۴۲٪ و تقویت‌شده با ورق فولادی ۱۵٪ بوده است. ولی باید این نکته را توجه داشت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به‌مراتب بیش‌تر از این مقدار باشد. زیرا شکست تمام دال ها از نوع برشی بوده و دال قبل از اینکه از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کند، گسیخته شده است. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی دال‌های تقویت‌شده، به‌مراتب بیش‌تر از آنچه مشاهده شده‌است می‌باشد.

مقایسه‌ی دال REF با دال‌های L-2، G-2 و C-2

اولین ترک خمشی ایجادشده در دال REF در بار ۳۱ kN بوده‌است در حالی که اولین ترک خمشی ایجادشده در دال‌های L-2، G-2، C-2 به‌ترتیب برابر ۴۵ kN، ۵۵ kN، ۵۰ kN بوده است. اولین ترک این دال‌ها در باری تقریباً ۱/۴۵، ۱/۷۷، ۱/۶۱ برابر دال

مرجع به‌وجود آمده است.

شکست دال REF در بار ١٦٦ kN اتفاق افتاد که این شکست از نوع خمشی بوده و با جاری شدن میلگردهای کششی همزمان بوده‌است، در حالی که شکست دال‌های L-2، G-2، C-2 به‌ترتیب ٢٣٧ kN، ٢٤٠ kN، ٢٦٠ kN بوده است و نوع شکست این دال‌ها، برشی و با جداشدگی ورق تقویتی از زیر دال همراه بوده است.

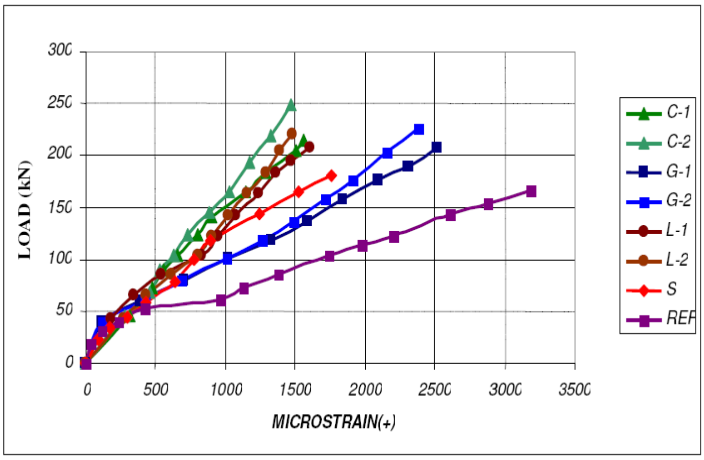
همان‌طور که مشاهده شد افزایش مقاومت ایجادشده در دال تقویت‌شده با لامینیت حدود ٤٣ ٪، تقویت‌شده با شیشه ٤٥٪، تقویت‌شده با کربن ٥٧٪ بوده است. ولی باید این نکته را توجه داشت که مقدار واقعی افزایش ظرفیت باربری می‌توانست به‌مراتب بیش‌تر از این مقدار باشد. زیرا شکست تمام دال‌ها از نوع برشی بوده و دال قبل از این‌که از تمام ظرفیت خمشی خود استفاده کند، گسیخته شده است. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که افزایش ظرفیت خمشی دال‌های تقویت‌شده، به‌مراتب بیش‌تر از آن‌چه مشاهده شده می‌باشد.

مقایسه‌ی کلی بین دال‌ها

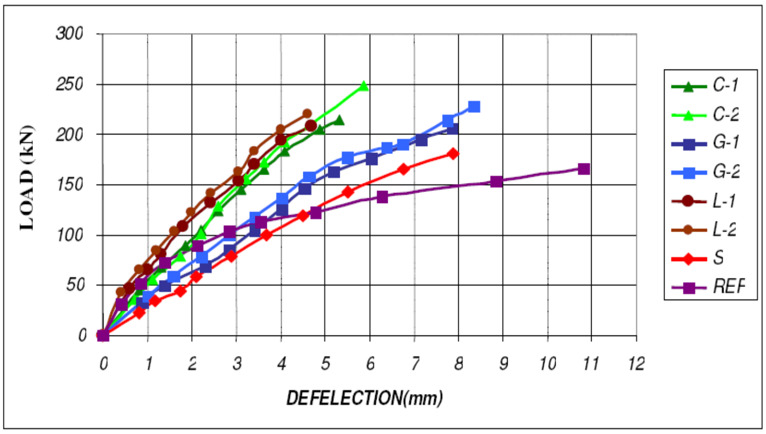
با مشاهده‌ی تایج حاصل از آزمایش‌ها با شرایط تقریباً یکسان برای این دال‌ها به نتایج زیر می‌رسیم.

مقاومت نهایی و سختی دال‌های تقویت‌شده در مقایسه با دال مرجع افزایش یافته و این در حالی است شکل‌پذیری آن‌ها کاهش یافته است. شکست در همه‌ی دال‌های تقویت‌شده از نوع برشی می‌باشد. از میان دال‌های تقویت‌شده، دال‌هایی که با کربن (*CFRP*) تقویت شده‌اند دارای مقاومت نهایی بیش‌تری نسبت به دیگر دال‌ها می‌باشند، اما شکل‌پذیری آن‌ها از دال‌های دیگر کم‌تر می‌باشد شکل(١٠ و ٩).

افزایش مقاومت نهایی دال‌های L-2، G-2 و C-2 که تقویت خمشی-برشی شده‌اند، نسبت به مقاومت نهایی دال‌های L-1، G-1، C-1 به‌ترتیب 59٪، 50٪ و 36٪ بوده است (جدول ٢). با توجه به شکل (١٠) درمی‌یابیم سختی دال L-2 از دال L-1، G-2 از G-1 و C-2 از C- 1 بیشتر می‌باشد. هم‌چنین مقاومت نهایی دال C-2 از بقیه‌ی دال‌ها بیش‌تر بوده است.



شکل ٩ مربوط به نمودار بار- کرنش کششی دال‌ها



شکل ۱۰ مربوط به نمودار بار- تغییر مکان دال‌ها

مقاومت برشی و نحوه‌ی گسیختگی دال‌ها

مقادیر بار نهایی، تغییر مکان وسط دهانه‌ی دال، بار ترک‌خوردگی، حالت شکست و میزان افزایش بار نهایی پس از تقویت نمونه‌ها در جدول (۲) و شکست نمونه‌ها در شکل‌های (۱۸-۱۱) ارائه شده است. در دال‌های گروه ۱ افزایش ظرفیت باربری نمونه های تقویت‌شده‌ی L-1، C-1 و G-1 نسبت به نمونه‌ی مرجع REF1 به‌ترتیب ٤٣.٧٥٪، ٦٢.٥٪ و ٣١٪ می‌باشد. در دال‌های گروه ۲ نیز افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت‌شده‌ی L-2، C-2 و G-2 نسبت به نمونه‌ی مرجع REF2 به‌ترتیب ٣٨٪، ٥٠٪ و ٢٢٪ می‌باشد. البته با توجه به نوع شکست دال‌ها که به علت جداشدگی الیاف FRP بوده این ظرفیت کم‌تر از مقدار حداکثری است که طبق آیین‌نامه‌ها برای حالت پارگی الیاف FRP پیش‌بینی می‌شود. هم‌چنین با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که با افزایش درصد آرماتورهای کششی طولی، مقدار افزایش ظرفیت برشی ناشی از الیاف تقویتی FRP کاهش می‌یابد. بدون شک برای تأیید این نتیجه، آزمایش‌های بیش‌تری باید صورت گیرد.

جدول۲ نتایج آزمایشگاهی

تیر	اولین بار ترک خوردگی (kN)	بار نهایی (kN)	تغییرمکان نهایی (mm)	افزایش بار نهایی پس از تقویت (٪)	نوع شکست
REF1	٣١	١٦١	١٠.٧٨٨	-	گسیختگی خمشی
L-1	٤٣	٢١٠	٤.٧١	٢٧	گسیختگی برشی
L-2	٤٥	٢٣٧	٤.٦٥	٤٣	گسیختگی برشی به همراه جداشدگی لامینیت CFRP از سطح بتن
G-1	٥٠	٢١٥	٧.٨٥٦	٣٠	گسیختگی برشی به‌همراه جداشدگی ورق GFRP
G-2	٥٥	٢٤٠	٨.٣٥٤	٤٥	جداشدگی ورق GFRP
C-1	٤٥	٢٣٥	٥.٣٣٤	٤٢	گسیختگی برشی به‌همراه جداشدگی ورق CFRP زیر تکیه گاه
C-2	٥٠	٢٦٠	٥.٨٧٦	٥٧	گسیختگی برشی به‌همراه جداشدگی ورق CFRP
S	٤٥	١٩٠	٧.٧٥٧	١٥	گسیختگی برشی



شکل ۱۱ شکست نمونه‌ی REF



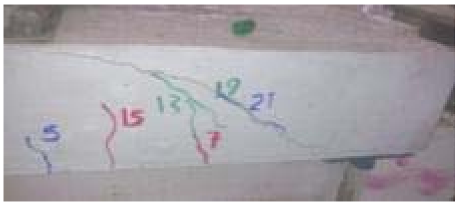
شکل ۱۲ شکست نمونه‌ی S-1



شکل ۱۳ شکست نمونه‌ی L-1



شکل ۱٤ شکست نمونه‌ی L-2



شکل ۱۵ شکست نمونه‌ی C-1



شکل ۱٦ شکست نمونه‌ی C-2



شکل ۱۷ شکست نمونه‌ی G-1



شکل ۱۸ شکست نمونه‌ی G-2

نتیجه گیری

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌هایی که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد به‌طور خلاصه بیان می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که نتایج مذکور طبق شرایط خاص تکیه‌گاهی، نوع بارگذاری و ابعاد هندسی موجود در این آزمایش به‌دست آمده است که این نتایج به شرح زیر می‌باشند:

۱. در اثر تقویت، شروع اولین ترک‌خوردگی در بار بیش‌تری نسبت به نمونه‌ی مرجع اتفاق افتاد.

۲.دال‌های تقویت‌شده با الیاف GFRP شکل‌پذیری به‌تری نسبت به دال‌های تقویت‌شده با الیاف CFRP در هر دو سری از خود نشان می‌دهند. در عین حال، مقاومت نهایی دال‌های تقویت‌شده با الیاف GFRP افزایش کم‌تری نسبت به دال‌های تقویت‌شده با الیاف CFRP دارند.

۳. گسیختگی در دال های تقویت‌شده با انواع FRP عموماً به‌واسطه‌ی جداشدگی (Delamination) و گسیختگی برشی دال رخ داده است.

٤. مقاوم‌سازی دال‌های سری ١ با میزان فولاد کششی ٢٥ درصد فولاد متعادل، مقاومت نهایی تیر در حدود ٦٢-٣١ درصد افزایش می‌دهد.
٥. حداکثر افزایش در مقاومت نهایی مربوط به آن سری از دال‌هایی است که آرماتور کششی طولی کم‌تری دارند.
٦. با توجه به نتایج به‌دست آمده استفاده از تقویت با ورق‌های GFRP به‌دلیل شکل‌پذیری بیش‌تر و افزایش مقاومت نزدیک نسبت به دیگر تقویت‌ها به‌تر می‌باشد.
٧. شکل‌پذیری دال‌های تقویت‌شده با ورق GFRP نسبت به دال‌های با تقویت‌های دیگر بیشتر است. در عین حال، مقاومت نهایی آن نسبت به تقویت با ورق‌های فولادی و لامینیت بیش‌تر اما نسبت به تقویت با ورق CFRP کم‌تر است.
٨. در اثر تقویت ترک‌های خمشی محدود شده و در هنگام شکست نهایی ترک‌ها خمشی- برشی رشد بیش‌تری پیدا کرده است.

مراجع

1. Taljsten, B., "Strengthening of Existing Concrete Structures with Epoxy Bonded Plates of Steel or Fiber Reinforcement Plastics", *J Mater Civil Eng*, 26(4), pp. 206-12, (1997).
2. Triantafilou, T.C., "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy- Bonded FRP Composites," *ACI Structure Journal*, 95(2), pp. 107-15, (1998).
3. Hotchinson A.R. and Rahimi H., "Behavior of Reinforced Concrete Beam with Externally Bonded Fiber Reinforced Plastics", *Proc 5th International Conference on Structural Faults and Repair*, University of Edinburg, Vol. 3, pp. 221-228, (1993).
4. Vasques, A. and Karbahari, VM., "Fiber Reinforced Polymer Composite Strengthening Concrete Slabs with Cutouts," *ACI Structure Journal*, 100(5), pp.58, (2003).
5. Mosallam, A.S. and Mosalamr, K.A., "Strengthening Two Way Concrete Slabs with FRP Composite Laminates," Constr Build Mater, 17, pp.43-54, (2003).

٦. بهرینی، روح‌الله، تقویت دال‌های بتن‌آرمه‌ی یک‌طرفه با استفاده از GFRP، سمینار کارشناسی ارشد، ، دانشگاه علوم و فنون، (١٣٨٦).

7. Zhang , B., Masmoudi, R., Benmokrane, B., " Behaviour of one-way concrete slabs reinforced with CFRP grid reinforcements" , Scincedirect, (2004).
8. Enochsson, O., Lundqvist , J., Rusinowski , P. and Olofsson.,T., "CFRP strengthened opening in two-way concrete", Scincedirect, (2004).